ChinaXiv合作期刊

第46卷　第1期
2023年1月

干旱区地理
ARID　LAND　GEOGRAPHY

Vol. 46　No. 1
Jan. 2023

科尔沁沙地大型沙波纹的初步研究

韩　广[1]，　龙　鲜[1]，　丁占良[2]，　冯净雪[1]

（1. 湖南师范大学地理科学学院，湖南　长沙　410081；2. 包头师范学院资源与环境学院，内蒙古　包头　014030）

摘　要：通过实地考察、观测和采样，利用Google Earth遥感影像和激光粒度分析仪，研究了科尔沁沙地大型沙波纹（large-scale ripples, LSR）的空间分布、单体和群体的基本形态和粒度特征，探讨了LSR粗颗粒的来源、它同普通沙波纹和普通风成沙在颗粒组成、形态特征和内部沉积结构方面的区别。结果表明：（1）科尔沁沙地的LSR主要分布于翁牛特旗中部和北部地区。（2）LSR空间单元的空间形态具有片状、斑块状和条带状3种类型，分别发育于宽阔的丘间地、沙丘中上部、槽形低地3类地形部位。（3）LSR平均长度为6.32 m，总体走向为东北—西南，平均波长为1.68 m，空间分异较为明显；单体LSR的前后坡不对称。（4）LSR的颗粒为中砂–粗砂粒级，其中粗颗粒主要来自旧河道的河流冲积层、下伏Q_3河湖相地层、剥蚀残山的风化壳和山麓洪积物。（5）LSR同普通沙波纹在外观、物质组成、几何形态和内部沉积结构方面有明显差异。该项研究将有助于促进风沙地貌学的理论发展和实践。

关 键 词：科尔沁沙地；大型沙波纹；形态特征；粒度特征；粗颗粒的物源

文章编号：1000－6060(2023)01－0056－09(0056～0064)

风成沙波纹是特定强度的风吹过松散砂质地表时所形成的一种微型风沙地貌类型，而对于粗砂含量较高的松散堆积物而言，在强风作用下则会发生明显的分选过程，形成较之普通沙波纹的高度至少大1个数量级的大型沙波纹（Large-scale ripples, LSR，也有人称其为mega-ripples）。从空间尺度来看，LSR是普通沙波纹、大型沙波纹、沙丘、沙丘群、沙漠等风成沙堆积地貌等级系列中的主要成员，反映着特定的空气动力学和物源特征。

国外开展LSR研究比较早，也比较成熟，最早可追溯到Bagnold[1]于1929—1938年在利比亚沙漠中对沙脊所做的研究。之后Sharp[2]、Zimbelman等[3]在美国西南部的沙漠，Wilson[4]、Ellwood等[5]和Foroutan等[6]在北非的沙漠，Fryberger等[7]在纳米布沙漠，Tsoar[8]和Yizhaq等[9]在以色列南部沙漠，Foroutan等[10]、Hugenholtz等[11]在伊朗东南部的Lut沙漠，对LSR的形态特征、物质组成、形成机制等方面开展了卓有成效的工作。

目前，国内对LSR所开展的研究很少，只有2012年Qian等[12]关于新疆库木塔格沙漠中LSR的形态与粒度特征的研究，以及2020年李鹤等[13]对乌兰布和沙漠西北缘山前洪积扇上的LSR所开展的研究。

总体而言，国内外的已有研究主要侧重LSR的单体形态、物质构成、形成演化机制等方面，而对其空间格局、群体的空间形态、粗颗粒物源的研究还很有限，且由于LSR所在地区闭塞的交通和艰苦的工作条件，高密度的路线考察、详细的形态测量工作开展得还很少。

通过对科尔沁沙地的多年多次实地考察、观测和室内遥感分析发现，LSR在该沙地有较广泛的分布，而且相对于其他沙地或沙漠的LSR而言，有其独特的区域特色。因此，对科尔沁沙地的LSR开展深入、系统的研究，无疑会进一步丰富风沙地貌学的研究内容，深化其理论内涵，加深对区域风沙地貌系统本质及其机理的认识，进而为中国“三北”地

收稿日期：2022-05-27；　**修订日期**：2022-08-18
基金项目：国家自然科学基金面上项目（41271025）资助
作者简介：韩广（1964-），男，博士，教授，主要从事风沙地貌学研究. E-mail: hanguang@hunnu.edu.cn
通讯作者：丁占良（1964-），男，本科，副教授，主要从事干旱区地理学研究. E-mail: dingzlnm@126.com

chinaXiv:202302.00271v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202302.00271v1

区的风沙灾害防治和沙地、沙漠的改造利用提供科学依据。

1　研究区概况

科尔沁沙地大致位于大兴安岭东南部、冀北-辽西山地以北、辽河一线以西、洮尔河以南的广大区域，主体部分集中在西拉木伦河中下游和西辽河两岸的平原上，总面积约4.23×10⁴ km²。科尔沁沙地大部分处于松辽沉降带内，周围山地丘陵的风化剥蚀产物被较为发育的水系携带到这里堆积，使得区域内地表松散沙堆积物非常丰富。地势总体上呈现西高东低，南北向中间西拉木伦河和西辽河倾斜的形势。

研究区离海洋较近，属于温带半干旱、半湿润大陆性季风气候，年均气温6.2 ℃，年平均降雨量284.4 mm，多集中于6—8月。受蒙古冷高压和太平洋暖低压消长变化的影响，当地冬、春季以西北风和偏北风为主，夏季以东南风和西南风为主；年均风速介于2~4 $m\cdot s^{-1}$之间，自西向东递减；全年起沙风(≥5 $m\cdot s^{-1}$)天数大于200 d，沙尘暴(≥17 $m\cdot s^{-1}$)天数超过30 d。

科尔沁沙地的主要河流除了西辽河及其主源西拉木伦河以外，尚有南侧的响水河、老哈河、教来河，北侧的查干木伦、乌力吉木伦、海哈尔河等支流，以及北部的霍林河。由于多种原因，西辽河及其主要支流的中下游处于断流状态，奈曼旗的西湖和舍力虎水库、开鲁县的莫力庙水库等主要湖泊/水库大多干涸消失。

科尔沁沙地除一部分地区呈现疏林草原、干草原、沼泽湿地景观外，大部分地区被农田、防护林、各类沙丘所占据。由于气候变湿、固沙造林等因素影响，大部分地区的沙丘趋于固定，流动沙丘仅集中于西部的翁牛特旗境内。流动沙丘稀疏生长着黄柳(*Salix gordejevii*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等，固定及半固定沙丘多生长小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、两栖蓼(*Polygonum amphibium*)等植物。科尔沁沙地的土壤以风沙土、软土、潮土、人为土为主。

2　数据与方法

2.1　实地考察与观测

2.1.1　野外考察　实地考察工作于2013—2017年的每年春季和夏季开展。第一，重点考察科尔沁沙地核心地带的老哈河下游、西拉木伦河中下游、响水河、教来河中下游、西辽河、秀水河上游(科左后旗东部)的沿河沙丘带；第二，考察科尔沁沙地边缘地带的查干木伦河(包括其源头和主要支流嘎拉达斯台河)、乌力吉木伦河中下游、海哈尔河中下游、霍林河中下游沿岸的沙地；第三，沿科尔沁沙地内主要交通线(包括国道、省道和穿沙公路)进行路线考察；第四，根据LSR的分布范围和发育特点对重点地段进行详细调查和观测。考察期间记录LSR分布地点的地理坐标，并对其进行详细描述、拍照、量测、采样。

2.1.2　形态量测　实地观测主要使用小卷尺、地质罗盘、电子坡度仪，选择LSR的中央典型部位，分别测量其单体宽度、高度(波高)、长度(侧向延伸距离)、间距(波长)、走向、迎风坡与背风坡的坡度。高度是利用1根带刻度的立杆和1根米尺进行测定，立杆用罗盘的长气泡调整其垂直度，米尺与立杆垂直，通过上下移动读出LSR顶部对应于立杆的数据，其中起算基点定在两LSR中间典型部位的浅槽或小洼地最低处；如果位于坡度明显的沙丘迎风坡或河岸斜坡上，则需将立杆垂直坡面，然后实施测定[13]。如此共获得观测数据15组，其中组合LSR数据5组，单体LSR数据10组。

2.1.3　样品采集　采取随机5点梅花式取样的方法，分别对LSR顶部表层1.0~1.5 cm的粗沙、采样厚度为5 cm的混层沙样和具普通沙波纹的沙丘表层沙进行采样，分别得到12、15和20个样，共47个沙样。

2.2　Google Earth影像分析与测量

2.2.1　分布范围　第一，在Google Earth遥感影像上找到野外考察中发现的LSR分布地点，并将其置于电脑液晶屏的中心，以尽可能减少几何变形；第二，放大图像直到LSR足够清晰可辩为止；第三，以LSR分布地点为中心，沿中心经线或纬线向两侧扩大范围搜索，记录LSR的分布位置与范围；第四，再以上述中心经线或纬线为参照，在影像可见范围内平移

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202302.00271v1

一定距离，但要保证2条扫描线之间的呼应，即至少要有1/10的影像重叠，搜索LSR，直至遍及整个区域；第五，将LSR分布地点标绘到地图或遥感影像上，由此确定其空间分布范围。

2.2.2 形态量测 选取往年春季比较清晰、高空间分辨率的卫星影像，将其置于电脑屏幕中央，然后使用Google Earth的测量工具直接实施量测。

鉴于交通条件和典型性，实地观测主要在西拉木伦河中游南岸片区和响水河东岸片区进行，获取其波长、长度、高度、前后坡角度等数据。每个片区随机测量30组LSR的数据，然后对其进行统计分析。为方便描述，本文将连续分布且界线明显的多个单体所在地段称为一个LSR空间单元（LSRSU）。

2.3 样品的粒度分析

粒度分析主要使用美国产Microtrac S3500激光粒度仪完成。由于该仪器所能检测的粒径最大为1.4 mm，故首先需要对所采的样品使用2.0 mm、1.4 mm和1.2 mm孔径金属筛进行筛分，手动计算各自的质量百分数，然后对粒径小于1.2 mm部分使用激光粒度仪进行测试。最后将筛分的结果与激光粒度仪测试的结果进行加权平均，以求得样品的实际粒度组成。

样品的平均粒径（M_Z，mm）、标准偏差（σ，mm）、偏度（SK）和峰度（KG）等粒度参数值使用McManus矩法计算[14]，计算公式为：

$$M_Z = \frac{\sum X_i f_i}{100} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - M_Z)^2 f_i}{100}} \quad (2)$$

$$\mathrm{SK} = \frac{\sum (X_i - M_Z)^3 f_i}{100\sigma^3} \quad (3)$$

$$\mathrm{KG} = \frac{\sum (X_i - M_Z)^4 f_i}{100\sigma^4} \quad (4)$$

式中：f_i为各粒级组的频率百分数（%）；X_i为各粒级组的中值（mm）。本文对粒径的分类与描述采用福克和沃德的粒度参数分级标准[15]。

3 结果与分析

3.1 空间分布特征

野外考察发现，凡植被覆盖比较好的地区或地段、距离基岩山地较远的地区，以及大兴安岭南段东南侧山间谷地和山麓地带都没有LSR分布。LSR比较集中连片且发育典型的地区主要局限于科尔沁沙地西部翁牛特旗所在的沙地区域和查干木伦河下游冲积平原部分地段，其中前者又集中于西拉木伦河中游南岸（片区A）、响水河东岸（片区B）和松树山（片区C）3个片区，后者（片区D）分布范围极其有限（图1）。

3.1.1 片区A 片区A空间范围广大，从西部的巴林桥附近一直延展到勃隆克草原-沙湖景区附近，长度达到45 km，最宽处可达12 km。就LSRSU而言，顺风向的纵向距离最长可达130 m，往往位于沙丘间宽阔的丘间地、平整开阔的沙丘迎风坡和沙丘间槽形低地中，LSR单体的排列很规则；短的纵向距离仅10 m左右，多位于沙丘迎风坡中上部或灌丛之间的裸地上，LSR单体排列不太规则（图2a）。LSRSU横向宽度变异较大，一般来说LSR越长，横向宽度越窄，往往是单体依序排列，横向单体排列多为1~3列，但在宽阔的丘间地中，纵向和横向距离都可以达到较大数值；而在沙丘迎风坡中上部，空间规模都很有限，一般纵向距离远小于横向距离，而且单体发育不规则，侧向并行排列甚至相互连接情况较普遍（图2b）。

3.1.2 片区B 片区B主要沿响水河东岸从响水河水库大坝开始，大致向NNE方向长条状延伸，长度达到23 km，宽度约1.6 km。LSR主要分布于河谷下风向的斜坡及沙丘上，LSRSU的几何形态同片区A基本一致，纵向距离最长可达134 m，而短的仅7~8 m，一般分布在沙丘中上部；条带式LSRSU横向宽度较小，但在风口处宽阔的丘间地中可以扩展到较大数值（图2a）。由于风沙流更为强烈，河岸斜坡和沙丘迎风坡中上部堆积作用强烈，使得LSRSU的空间规模更小且更零散，多呈斑块状（图2a）。

此外，由于河谷的地形强制转向和加速作用，在河漫滩同河岸斜坡交接部位，往往会发育出条带状LSRSU，甚至沿斜坡上升（图2c）。冬季河流和湖泊水面、河漫滩冻结，风沙流可从上风向长驱直入，因而在河床和河漫滩上也会形成规模不等的LSRSU（图2d）。

3.1.3 片区C 由于多山、地形复杂，由此造成的风动力条件空间变异较大，加之物源分布不规则等原因，片区C南部LSR主要分布于两山之间的狭窄部位和山麓边缘灌丛间裸地，LSRSU多呈长条带状分布，长度可达90 m，单体顺风向规则排列，中部的长度较大，两端较短，整体上似细长的不规则梭形。

ChinaXiv合作期刊



注：A、B、C、D分别为西拉木伦河中游南岸、响水河东岸、松树山、查干木伦河下游4个片区。

图1　科尔沁沙地西部大型沙波纹的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of large-scale ripples in the western Korqin Sandy Land

(a) LSRSU的空间形态

(b) 平整的沙丘迎风坡　(c) 河流阶地斜坡　(d) 河漫滩

注：LSRSU为一个LSR空间单元；P、PL、S分别为斑块状、片状、条带状LSRSU；R为着生灌丛的风蚀垄。

图2　LSRSU空间形态特征

Fig. 2　Spatial morphologic characteristics of LSRSU

片区北部山体稀疏，横向沙丘群发达，除条带状LSRSU外，沙丘中上部小面积斑块状和丘间地大面积片状LSRSU很发达，分布也很广泛，长度在50~80 m之间，宽度可达90 m。

3.2　几何形态特征

3.2.1　实测值　整体而言，LSR的波长为1.22±0.46 m，空间变异幅度较大；波高（高度）为12.13±2.75 cm，空间变异也较大，即使在平坦地面上，两相邻单体的高度也不尽一致；波纹指数（波长与波高之比；Ripple index，RI）为10.20，同普通沙波纹的RI取值范围（>10.00）一致[16]，但明显偏小且接近临界值，也明显小于我国西北地区库姆塔格沙漠（20.40）[12]和美国加州Mojave沙漠（15.00）[2]。

LSR前后坡的坡度又有上部和下部的区别，迎

chinaXiv:202302.00271v1

ChinaXiv合作期刊

风坡下部由于侵蚀的原因角度较大，为12.17°±1.22°，空间变异不大，较为稳定；而迎风坡上部以堆积为主，坡度转缓，为6.64°±0.99°，也很稳定。背风坡则反过来，上部很陡，达到26.22°±2.47°，接近普通沙丘落沙坡的自然休止角，但坡很短，高度不超过2 cm，这与Hoyle等[17]的研究结果相同；下部基座则较缓，为5.49°±0.89°，然后过渡到脊间波谷底部。这些结果同Werner等[18]对普通沙波纹和Sharp[2]对LSR的测量结果基本一致。

LSR单体的长度变化很大，介于3.18±1.40 m之间，地表相对平整且物源丰富，则会使相邻的单体侧向联合起来，延伸较远(图2b)。

LSR的延伸方向基本与局地盛行风向垂直，沙丘上和较大的丘间地中，往往呈东北—西南延伸。当气流在东西向风蚀垄或沙垄引导下转成西风时，LSR的走向近似南北方向。在有些河段的河谷中，由于地形的强制转向与引导作用，走向与河岸近乎垂直。

一般来说，在地表平坦均一的地段，单体LSR呈现较均匀的直线或较平滑的蛇曲形(图2b)，而在条带状LSRSU中，单体形态较复杂，新月形、直线形、蛇曲形，甚至反新月形都可观察到。

3.2.2 Google earth测量结果 由表1可知，科尔沁沙地LSR的平均长度为6.32 m，空间差异比较大，最长可达11.97 m，最短的仅2.68 m；走向平均为43.87°，基本垂直于当地盛行西北风，最大值可达85.25°，近乎东西向延伸，明显是受地形的强制转向气流影响所致；平均波长为1.68 m，最大可达3.49 m，最小值仅0.69 m，空间变异性较大。

整个区域LSR的形态特征存在明显的地域差异。片区A和C的长度较大，片区B较小；走向基本为东北—西南向，但片区B的响水河东岸斜坡和邻近的河漫滩边缘，以及片区C南部的剥蚀残山地区，LSR的走向可转为近乎东西方向；片区C的LSR波长最大，片区B次之，片区A最小。

整体而言，LSR的长度、走向和波长等形态示量指标受局地物源、地形、地表性质和风况影响很大。上风向地形开阔平坦、地表性质基本均一的地段，LSR往往长度较大，侧向联接普遍，反之长度很有限；特定风力条件下，地表相对坚实平整或槽形低地处波长较大。

3.3 粒度特征

LSR顶部表层粗颗粒的平均粒径为0.72 mm，属于中砂粒级，表明风力较为强劲，但较之我国西北地区的要低[12-13]；平均标准偏差为0.17 mm，属于分选极好类型，说明沉积环境或动力条件稳定；平均偏度为0.66，属于近对称到正偏范围，粗颗粒较之细颗粒偏多；平均峰度为4.75，很宽平，表明粒径分布并非过度集中，风动力条件有波动(表2)。

LSR混层沙平均粒径为0.60 mm，仍属于中砂粒级；标准偏差平均值为0.20 mm，属于分选极好级别；偏度平均值为-0.76，属于极负偏到负偏类型，表明细砂含量明显高于中砂含量；峰度平均值为3.74，属于宽平到很宽平，说明起动风速之上风力有波

表1 大型沙波纹的形态特征

Tab. 1 Morphometric features of large-scale rippls

片区	数值类型	长度/m	走向/(°)	波长/m
A	最小值	4.29	27.75	0.69
	最大值	10.85	50.76	1.67
	平均值	7.16	42.44	1.16
	标准差	2.13	8.24	0.46
B	最小值	3.48	16.64	0.98
	最大值	7.37	85.25	2.16
	平均值	5.24	49.18	1.57
	标准差	1.85	26.83	0.53
C	最小值	2.68	22.08	1.46
	最大值	11.97	51.57	3.49
	平均值	6.43	39.98	2.28
	标准差	2.85	10.84	0.51
全区	总平均	6.32	43.87	1.68

注：A、B、C分别为西拉木伦河中游南岸、响水河东岸、松树山片区。

chinaXiv:202302.00271v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202302.00271v1

动，但却是渐次变化，而非剧烈波动，同时沙粒的组成并非均匀。

4 讨 论

4.1 粗颗粒的物源

正如Bagnold所指出的那样，LSR的形成与维持要有基本恒定、足够数量的粗颗粒和细沙供应，风力要达到足够强但又不能强大到摧毁LSR的程度[1]。对于科尔沁沙地西部而言，风动力条件在冬春季节（特别是冷空气过境期间）足够强劲，满足粗颗粒起动和运移的条件；该区下伏Q_3灰白色松散砂分布非常广泛，厚度也比较大，主要为细沙粒级，细沙供应充足。

从野外考察来看，LSR顶部、内部和脊两侧的粗颗粒绝大多数为暗色调的石榴子石、绿帘石、角闪石、赤褐铁矿等暗色矿物，尚有一部分中酸性火山岩和凝灰岩碎屑。除角闪石外，这些碎屑物质均属较稳定和稳定矿物，已经过一定距离的搬运，但较大比例角闪石的普遍存在，又说明搬运的距离并不很远。

就其具体和直接的物源而言，片区A和D的粗颗粒直接来自河流出山口之后的冲积平原，有些地段处于旧河床上，粗沙、细砾乃至细卵石混杂在一起，粗颗粒很丰富（图3a）。片区B则出自下伏松散的河湖相地层，中砂到粗沙级别颗粒含量相对较高（图3b），由于强劲的风力不断吹扬河谷下风向斜坡上的这组沉积物，因而LSR发育比较典型，分布也较广泛；由于初始物源主要来自响水河水坝附近的剥蚀残山，经过河水搬运已有一定程度分选，故颗粒较其他片区要细些。片区C的物源直接来自松树山，搬运距离很近，颗粒相应地也较粗（图3c）。

由此可见，科尔沁沙地LSR的粗颗粒物源主要有3个来源：一是地表河流冲积物，粗颗粒供应非常充足；二是二级阶地下伏的Q_3松散砂地层，由于河流下切与侧蚀而暴露出来，在盛行强风作用下不断被风蚀吹扬，粗颗粒物源充足，但其出露的空间范围比较有限，使得风动力条件的作用范围很有限，横向延伸较远，但纵向距离有限；三是剥蚀残山的风化壳和季节性水流产生的山麓洪积扇，粗颗粒供应充足，分布范围也比较广大。

4.2 与普通风成沙的区别

第一，从实地观察和遥感影像分析来看，由于LSR表面颗粒较粗，多由暗色矿物和岩石碎屑构成，对光线的吸收比较强烈，所以在较远的距离和较高空间分辨率的遥感影像上很容易判别其存在与否及其空间规模和结构，明显区别于由灰白色或浅黄色细沙构成的普通风成沙，后者在通用或商用遥感影像上难以分辨。

第二，从粒配曲线看[19]，LSR呈双众数分布，而普通风成沙则为单众数分布，这一点同其他地区的LSR粒径组成一致[2-7]。以片区B为例，LSR在整个沙丘表层剖面中中砂含量最高（49.62%），细砂含量较高（28.42%），粗砂含量为19.65%[20]。这种粒度组成有利于LSR的发育，其中细砂的作用一方面是借助其所产生的跃移颗粒的动量冲击粗颗粒，使其滚动、蠕动或跳跃运动；另一方面则在于使运动的粗颗粒在降落到细砂层后被捕获停积下来，使粗颗粒不断积累加高，进而形成一定高度的脊部。

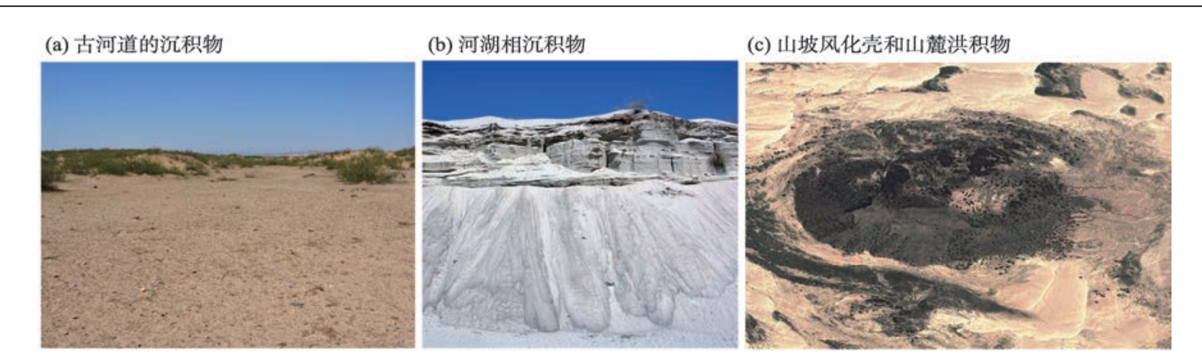
第三，从内部沉积结构来看，LSR顶部、脊前和脊后表层（s）均为黑色和灰黑色中粗砂，厚度1.5~1.8 cm，其中脊前的迎风坡表面还有最近沉积的灰白色细沙纹层，前积层不明显；再向下为厚5~8 cm近乎水平的明暗互层部分（u），每层厚约1~2 cm；再下为明暗交互的纹层部分(l)（图4a），纹层厚约2~3 mm，这与Fryberger等[7]在纳米布沙漠中所观察到的沉积结构类似。这种纹层序列垂直向下至少达到1.5 m

表2　大型沙波纹的粒度参数

Tab. 2　Granulometric parameters of large-scale rippls

部位	数值类型	平均粒径/mm	标准偏差/mm	偏度	峰度
顶部	最小值	0.65	0.09	0.23	1.99
	最大值	0.81	0.24	1.20	13.42
	平均值	0.72	0.17	0.66	4.75
混层	最小值	0.47	0.08	−2.00	1.84
	最大值	0.74	0.29	−0.13	11.36
	平均值	0.60	0.20	−0.76	3.74

ChinaXiv合作期刊



注：图a为西拉木伦河旧河床，颗粒较粗，可见拳头大小砾石；图b为响水河东岸一处采沙场的Q_3河湖相地层，陡崖下部滑落的松散堆积物表层舌状灰黑色物质，则为由角闪石、石榴子石、绿帘石、岩石碎屑等构成的粗颗粒；图c为松树山北部一座山体周边的坡积裙和洪积扇，山体北部和东部季节性沟谷比较发育，每年搬运下来大量风化剥蚀物质，颗粒较粗。

图3　大型沙波纹的粗颗粒来源

Fig. 3　Sources of coarse grains of large-scale rippls

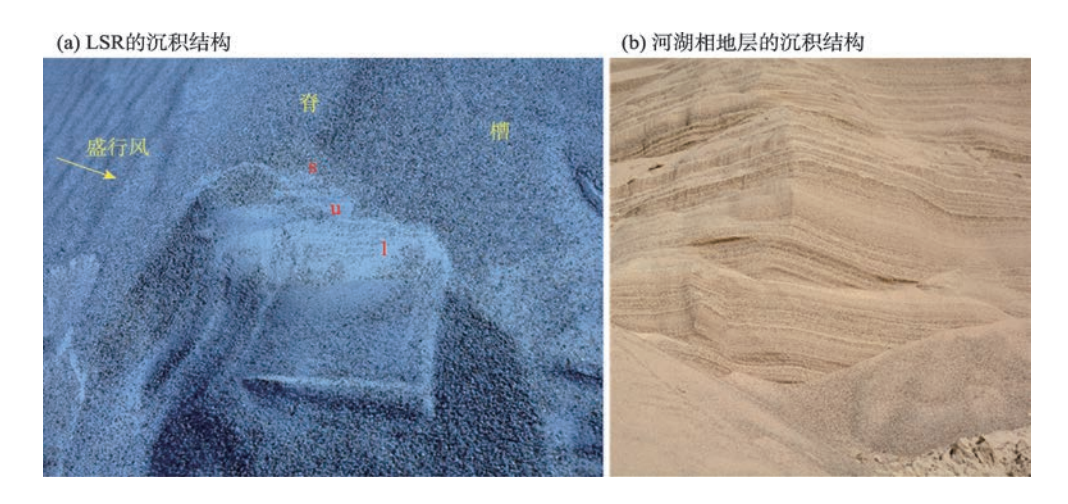
深度，而且同下伏Q_3河湖相松散砂的沉积序列近乎一致（图4b）。这种现象说明LSR上部表层的粗颗粒沉积属于动态沉积产物，下一场强风过程会将其形态和位置加以改变，而下部沉积层相对而言比较稳定。这种内部沉积结构同普通沙波纹明显不同[2,18]。

4.3　与普通沙波纹的区别

第一，LSR同普通风成沙波纹在空间尺度上差异明显。如前所述，科尔沁沙地普通沙波纹波长一般10~15 cm，高度约为1~2 cm，而LSR的波长多在1.2 m，高度在12 cm以上，后者比前者至少要大1个数量级。同时，相对于普通沙波纹而言，LSR对称性要大得多，即前坡和后坡形态差异不是很大[21]。

第二，两者分布的空间范围差异很大。整个科尔沁沙地到处都可以见到规模不等的沙波纹，即使在固定沙丘区，只要存在灌丛间的小片裸沙，沙波纹即可发育，而LSR的发育要严格得多，需要较强的风力和比例适宜的粗颗粒，因而主要分布于科尔沁沙地西部接近石质山丘的区域。

第三，在适宜的起沙风和地形条件下，沙丘表面甚至落沙坡都可以发育沙波纹，而LSR则局限于上风向地形比较开阔或槽形洼地内，在沙丘上一般仅分布到沙丘中部，只有在缺乏落沙坡的弧形沙丘上或沙丘顶部超前于落沙坡脊线的沙丘上，LSRSU才会出现在顶部，甚至下风向的沙丘斜坡上。一场强风过程的后期，风速逐渐降低，如果中等强度的风况维持足够长时间的话，除个别地段外，整个沙丘会被一层沙波纹网格所笼罩，蔚为壮观（图5），但



注：图a为典型LSR横剖面形态，其中s为表层粗沙，u为间隔较大的上部明暗交互层，l为间隔很小的下部明暗交替纹层；图b为下伏河湖相沉积层中的层理和其中的纹层，暗色纹层颗粒较粗。

图4　大型沙波纹的内部沉积结构

Fig. 4　Interior sedimentary structure of large-scale rippls

chinaXiv:202302.00271v1

ChinaXiv合作期刊



图5　沙丘表面普通沙波纹和大型沙波纹的空间格局

Fig. 5　Spatial pattern of common ripples and large-scale ripples on the surface of a complex dune

部分LSR会被逐渐掩埋或改造。

第四，一般情况下，风力会先在沙丘上风向风蚀平地或风蚀槽中形成LSRSU，然后在障碍物附近或下风向沙丘表面特定部位发育片状或斑块状LSR群。但在较弱的起沙风作用下，普通沙波纹群往往会覆盖先成的LSR，这时前者会分布于LSRSU上风侧。

5　结 论

利用野外实地考察、观测与室内粒度和遥感影像分析相结合的方法，本文对科尔沁沙地大型沙波纹（LSR）的空间分布、形态、沉积结构特征和物质来源等方面进行了系统分析，得到以下主要结论：

（1）科尔沁沙地的LSR主要分布于西部翁牛特旗中部和北部的西拉木伦河中游南部、响水河东岸、松树山和查干木伦河下游4个片区，邻近周围的石质山地和丘陵，其中西拉木伦河中游南部片区空间规模最大，后者最小。

（2）LSR空间单元的空间形态具有片状、斑块状和条带状3种类型，分别发育于宽阔的丘间地、沙丘中上部、槽形低地3类地形部位上。

（3）LSR平均长度6.32 m，地域差异明显；总体走向为东北—西南走向，与当地风季盛行风向垂直，地域差异不大；平均波长为1.68 m，地域差异明显；单体LSR的前后坡不对称，其落沙坡上部自然休止角接近30°。

（4）LSR的颗粒较粗，达到中砂-粗砂粒级，较之我国西北地区和国外西亚、北非等地的要细；粗颗粒主要来自旧河道的河流冲积层、下伏Q_3河湖相松散砂层、剥蚀残山的风化壳和山麓洪积物。

（5）LSR同普通沙波纹在外观、物质组成、几何形态和内部沉积结构方面有明显差异，但两者都是风积地貌等级系列中的小尺度横向类型，都可以叠加于各种沙丘表面。

参考文献（References）

[1] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941: 153-157.

[2] Sharp R P. Wind ripples[J]. Journal of Geology, 1963, 71(5): 617-636.

[3] Zimbelman J R, Irwin III R P, Williams S H, et al. The rate of granule ripples movement on Earth and Mars[J]. Icarus, 2009, 203 (1): 71-76.

[4] Wilson I G. Aeolian bedforms: Their development and origins[J]. Sedimentology, 1972, 19(3-4): 173-210.

[5] Ellwood J M, Evans P D, Wilson I G. Small scale aeolian bedforms [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1975, 45: 554-561.

[6] Foroutan M, Steinmetz G, Zimbelman J R, et al. Mega-ripples at Wau-an-Namus, Libya: A new analog for similar features on Mars [J]. Icarus, 2019, 319: 840-851.

[7] Fryberger S G, Hesp P, Hastings K. Aeolian granule deposits, Namibia[J]. Sedimentology, 1992, 39(2): 319-331.

[8] Tsoar H. Grain size characteristics of wind ripples on a desert seif dune[J]. Geography Research Forum, 1990, 10: 37-50.

[9] Yizhaq H, Isenberg O, Wenkart R, et al. Morphology and dynamics of aeolian mega-ripples in Nahal Kasuy, southern Israel[J]. Israel Journal of Earth Sciences, 2009, 57: 149-165.

[10] Foroutan M, Zimbelman J R. Mega-ripples in Iran: A new analog for transverse aeolian ridges on Mars[J]. Icarus, 2016, 274: 99-105.

[11] Hugenholtz C H, Barchyn T E. A terrestrial analog for transverse aeolian ridges (TARs): Environment, morphometry, and recent dynamics[J]. Icarus, 2017, 289: 239-253.

[12] Qian G, Dong Z, Zhang Z. Granule ripples in the Kumtagh Desert, China: Morphology, grain size and influencing factors[J]. Sedimentology, 2012, 59(6): 1888-1901.

[13] 李鹤, 丁占良, 尤莉, 等. 乌兰布和沙漠西北缘大型沙波纹的初步研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(9): 129-136. [Li He, Ding Zhanliang, You Li, et al. A preliminary study of large-scale ripples in the northwest margin of Ulanbuh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(9): 129-136.]

[14] McManus J. Grain size determination and interpretation[J]. Techniques in Sedimentology, 1988, 408: 112-116.

[15] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.

[16] Pye K, Tsoar H. Aeolion sand and sand deposition[M]. London: Unwin Hyman, 1990: 176-183.

chinaXiv:202302.00271v1

ChinaXiv合作期刊

[17] Hoyle R B, Woods A W. Analytical model of propagating sand ripples[J]. Physical Review E, 1997, 56(6): 6861-6868.
[18] Werner B T, Haff P K, Livi R P, et al. The measurement of eolian ripple cross-sectiooal shapes[J]. Geology, 1986, 14: 743-745.
[19] 王勇. 科尔沁沙地西部响水河中游右岸沙丘群的沙源分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2016. [Wang Yong. Analysis of sand source about sand dunes on the right bank of the middle Xiangshui River in the west of the Horqin Sandy Land[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016.]
[20] 王勇, 韩广, 杨林, 等. 响水河中游右岸沙丘群粒度分布特点[J]. 中国沙漠, 2017, 37(1): 26-32. [Wang Yong, Han Guang, Yang Lin, et al. Grain size characteristics of sand dunes on the right bank of the middle Xiangshui River[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(1): 26-32.]
[21] Warren A. Dunes: Dynamics, morphology, history[M]. New York: Wiley-Blackwell, 2013: 109-111.

Preliminary study of the large-scale ripples in the Korqin Sandy Land

HAN Guang[1], LONG Xian[1], DING Zhanliang[2], FENG Jingxue[1]
(1. College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, Hunan, China;
2. School of Resources and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract: Although large-scale ripples (LSRs) are widely distributed in various desert regions of the globe, there are few studies on LSR in China. Through field investigations and observation, remote sensing imagery analysis by Google Earth, and a laser particle size analyzer, spatial distribution patterns and fundamental morphometric and grain size features of both individual and collective forms of LSRs in the Korqin Sandy Land of China are explored. Furthermore, coarse grain sources, differences in granulometric distribution, morphometric features, interior sedimentary structures between LSRs and common ripples, and differences between sands from LSR and common wind ripple are discussed in this study. The results are as follows: (1) LSRs are primarily concentrated on the central and northern parts of Ongniud Bannar, the western extreme of Korqin Sandy Land, and close to or surrounding nearby rocky mountains; they are also primarily distributed in the southern zone of the middle Xilamulun River, on the eastern banks of the Xiangshui River, in the area of the Songshu Mountain, and on the fluvial plain of the lower Chaganmulun River. (2) In line with the dimension, shape, and location of LSRs, plot-, patch-, and stripe-shaped LSR spatial units can be recognized, which are mainly generated on such geomorphic positions as broad interdune, central and upper stoss of a dune, and trough-like lowland, respectively. (3) The average length of LSR is 6.32 m, with an obvious spatial difference; the average strike is NE-SW, significantly perpendicular to the local predominant wind direction and with an insignificant spatial difference; the average spacing is 1.68 m, with a spatial difference; individual LSR has a dissymmetric cross-section. (4) The grains of LSR are comparatively coarser, belonging to the class of middle-coarse sand, which are, however, thinner than those in northwestern China, West Asia, and North Africa; coarse grains are mainly derived from fluvial sediments on ancient river channels, underlying fluvial-lacustrine sediments of late Quaternary, and weathering crusts and alluvial deposits on foothills of nearby denuded mountains. (5) There are considerable differences in appearance, grain composition, geometric morphology, and internal sedimentary structure between LSRs and common sand ripples, which are the small-scale perpendicular bedforms among aeolian depositional landforms and can superimpose on the surfaces of various dunes. The research will, to some extent, advance the principle theories of aeolian geomorphology and effective sand-control practice.

Key words: the Korqin Sandy Land; large-scale ripple (LSR); morphometric features; granulometric characteristics; coarse grain sources

chinaXiv:202302.00271v1